

В. В. Постнов, С. Х. Хадиуллин, Е. Н. Малахов, С. В. Старовойтов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РЕЖУЩИЕ СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрено влияние свойств обрабатываемого материала на режущую способность инструментальных твердых сплавов на основании исследования локализации пластической деформации в приповерхностных слоях режущего инструмента и изучения структурно-фазового состава приконтактных слоев. *Марка инструментального материала; энергия формоизменения; износ инструмента; приконтактный слой; обрабатываемый материал; адгезия*

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшие режущие свойства инструментальных материалов, как их эксплуатационные характеристики, традиционно определяются твердостью, прочностью, износостойкостью и теплостойкостью [1, 2]. Высокая твердость инструментального материала необходима для внедрения режущей кромки инструмента в обрабатываемый материал. Высокая прочность предохраняет режущую кромку от разрушения. Прочность приобретает главенствующее значение в случае черновой обработки. Высокая износостойкость важна в связи со значительным трением, возникающим на контактных поверхностях инструмента. Высокая теплостойкость необходима для сохранения твердости инструментального материала при высоких скоростях (температурах) резания. Определяющей характеристикой режущих свойств инструментальных материалов является их износостойкость, оцениваемая интенсивностью износа рабочих поверхностей.

Изучение закономерностей протекания и параметров контактных процессов (характеристик деформации срезаемого слоя, удельных касательных и нормальных нагрузок на передней и задней поверхностях инструмента, характеристик адгезионного взаимодействия, диссипативных характеристик локального контакта и т. д.) имеет большое значение для реализации термодинамического подхода к оценке обрабатываемости металлов резанием, оптимизации и управления процессом лезвийной обработки.

### 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Традиционные методы исследования износостойкости режущего инструмента не объясняют физических причин и закономерностей процесса износа и не дают возможности раскрыть его механизм и характер. Проблемы повышения стойкости режущих инструментов должны решаться на базе теории трения и износа, теории пластичности и прочности, изучения закономерностей диффузионных процессов в зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов [2].

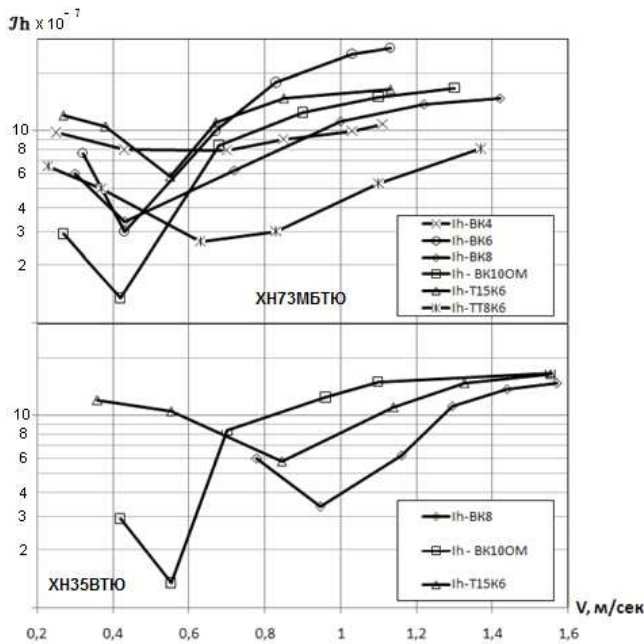
Для оценки износостойкости режущего инструмента и обрабатываемости исследуемых сталей и сплавов использовали относительный линейный износ или интенсивность износа как универсальную характеристику размерной стойкости [2], не зависящую от критерия затупления инструмента.

На рис. 1 представлены зависимости интенсивности износа от скорости резания. Для всех исследованных сочетаний инструментальных и обрабатываемых материалов они имеют немонотонный характер с одним (для ХН73МБТЮ и ХН35ВТЮ) минимумом при оптимальных скоростях (температурах) резания.

$$\left( \begin{array}{l} \alpha = \alpha_1 = 10^\circ; \gamma = 0^\circ; \varphi = \varphi_1 = 45^\circ; \lambda = 0^\circ; \\ r = 0,3 \text{ мм}; t = 0,25 \text{ мм}; S = 0,1 \text{ мм/об} \end{array} \right)$$

Сопоставление зависимостей  $J_h(V)$  (рис. 1) для различных сочетаний обрабатываемых и инструментальных материалов показывает,

что как характер зависимостей  $J_h(V)$ , так и расположение их относительно осей координат существенно зависит прежде всего от марки обрабатываемого материала.



**Рис. 1.** Влияние скорости резания на  $J_h(V)$  при точении материалов ХН73МБТЮ и ХН35ВТЮ резацами из различных инструментальных материалов

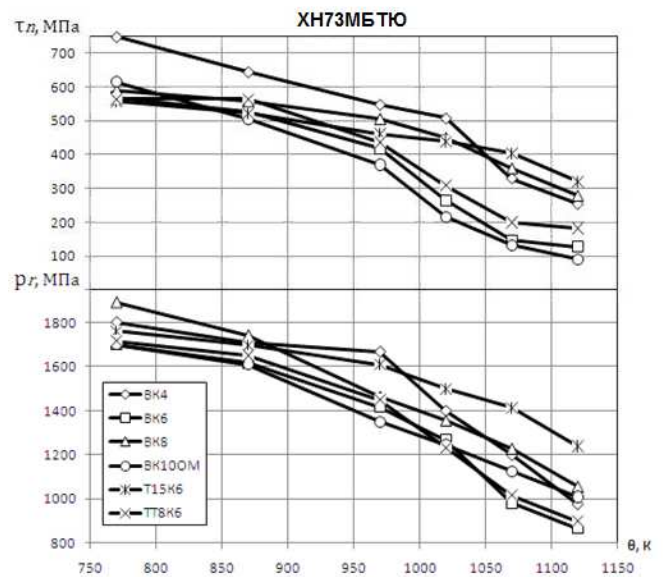
Одновременно с исследованиями интенсивности износа инструмента измерялась температура в зоне резания. Характеристики трибологических свойств инструментальных и обрабатываемых материалов при различных температурах и давлениях изучались на моделирующих установках

В работе Л. Ш. Шустера, В. В. Постнова [3] и др. показано, что указанное выше влияние химического состава обрабатываемых и инструментальных материалов на величину оптимальных скоростей резания, уровень и характер зависимостей интенсивности износа реализуется через фрикционное контактное взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов.

В аналитическом выражении энергии формоизменения, представленной в [4], в качестве удельных нагрузок используются тангенциальная прочность адгезионной связи  $\tau_n$  и нормальная удельная нагрузка на пластически насыщенном упругом адгезионном контакте  $p_r$ .

В связи с этим по методике, описанной в [3], проведены исследования для определения температурных зависимостей параметров адгезионного взаимодействия различных сочетаний ин-

струментальных и обрабатываемых материалов. Результаты исследований, полученных как средние значения 2–3 опытов, приведены на рис. 2 и 3.



**Рис. 2.** Зависимость прочности межмолекулярной связи  $\tau_n$  и нормального удельного давления  $p_r$  от температуры контакта

На основании экспериментальных данных по температурным зависимостям (рис. 2–3) прочностных характеристик фрикционного контакта сформулированы следующие закономерности:

1. При повышении температуры контакта тангенциальная прочность адгезионной связи  $\tau_n$  уменьшается вначале незначительно, затем, в интервале температур выше 870–1020 °К, происходит более интенсивное ее снижение. Температура  $\theta_{\text{хар}}$  начала резкого снижения  $\tau_n$  названа в работе [3] характерной.

2. Нормальное удельное давление  $p_r$  для всех исследованных пар монотонно убывает во всем диапазоне температур.

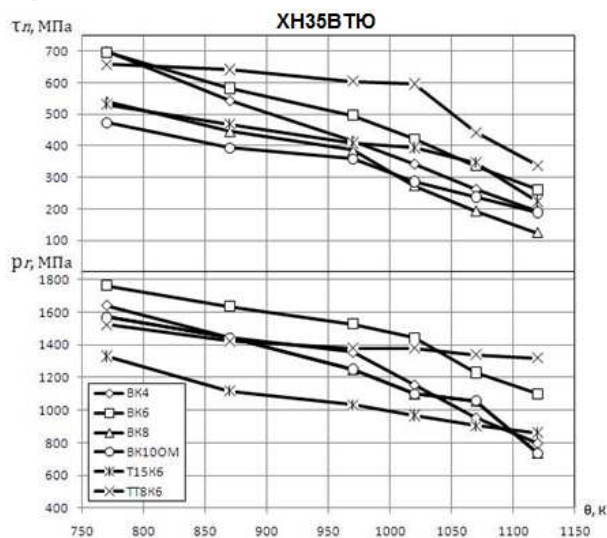
Более интенсивное снижение  $\tau_n$  при температурах выше  $\theta_{\text{хар}}$ , очевидно, связано с явлениями разупрочнения фрикционного контакта. С дислокационных позиций это может быть объяснено следующими соображениями [3]:

1. С повышением температуры облегчается движение дислокаций, так как уменьшается количество препятствий, тормозящих их перемещение. Особенно облегчаются перемещения по границам зерен, когда помимо сдвигового механизма существенную роль начинает играть механизм диффузионной пластичности.

2. Повышение температуры выше  $\theta_{\text{хар}}$  ведет к увеличению числа дислокаций в кристаллической решетке и адгезионном шве.

3. С повышением температуры контакта снижается энергия выхода дислокаций на поверхность, т. е. энергия адгезионного взаимодействия [3].

Эти три фактора в сумме обеспечивают интенсивное снижение  $\tau_n$  при температурах выше  $\theta_{\text{хар}}$ .



**Рис. 3.** Зависимость прочности межмолекулярной связи  $\tau_n$  и нормального удельного давления  $p_r$  от температуры контакта

Характерная температура контакта  $\theta_{\text{хар}}$  совпадает с областью провала пластичности жаропрочных сплавов на никелевой основе [3]. Эта же температура  $\theta_{\text{хар}}$  близка по своим значениям к оптимальной температуре резания  $\theta_0$ , которая соответствует минимальному относительному износу твердосплавного инструмента.

Экспериментально определив температурные зависимости  $\tau_n$  и  $p_r$  и рассчитав  $f_a$ , можно получить значения  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{-1}$ ,  $\sigma_{\text{ш}}$ ,  $n_{\text{кр}}$ ,  $K_f$  (см. таб-

лицу), входящие в уравнение [4] для определения предельной (критической) энергии формообразования  $U_{\text{ф}}$ .

Анализ влияния химического состава инструментального материала на параметры, определяющие критическую энергию формообразования (см. таблицу), позволили установить, что с увеличением доли кобальтовой фазы в твердом сплаве локальная интенсивность износа, отнесенная к единичному пятну контакта  $i_h$ ; коэффициент адгезии  $K_f$  и критерий, связанный с образованием и ростом усталостной микротрещины  $n_{\text{кр}}$  изменяются незначительно. Величина напряжения  $\sigma_{-1}$ , которая обеспечивает локальные сдвиги в объеме под действием внешних нагрузок, для твердых сплавов группы WC-Co существенно отличается от групп WC-TiC-Co и WC-TiC-TaC-Co, причем с увеличением доли кобальтовой фазы происходит ее снижение.

Это объясняется влиянием доли кобальтовой связки на энергию пластической деформации кобальтовой прослойки и критическую длину микротрещин, образующих будущий фрагмент износа.

На величины удельной энергии формоизменения  $U_{\text{ф}}$  и гидростатического давления  $\sigma_{\text{ш}}$  содержание кобальтовой фазы в твердом сплаве оказывает неоднозначное влияние. Увеличение содержания кобальта в твердом сплаве способствует повышению уровня локальной интенсивности износа, отнесенной к единичному пятну контакта  $i_h$  вследствие обеспечения развития микротрещин по кобальтовой прослойке и большего, в связи с этим размера частицы износа. Аналогичные данные по влиянию содержания кобальта на интенсивность износа твердосплавных резцов групп WC-Co, WC-TiC-Co и WC-TiC-TaC-Co при изменении Co от 4 до 12% были получены в работе [3].

#### Влияние химического состава инструментального материала на параметры, определяющие критическую энергию формообразования

Материал детали	Материал инструмента	$i_h$	$\theta_{\text{хар}}$	$K_f$	$n_{\text{кр}}$	$U_{\text{ф}}$	$\sigma_m$	$\sigma_{-1}$	$\sigma_{\text{ш}}$
ХН73МБТЮ	БК4	0,351	970	1,197	0,545	1010	983	23380	816
	БК6	0,352	950	1,194	0,544	791	953	13440	791
	БК8	0,353	950	1,187	0,543	1521	1027	10550	852
	БК10ОМ	0,354	950	1,181	0,542	948	947	3185	786
	Т15К6	0,357	970	1,153	0,535	782	943	84960	782
	ТТ8К6	0,355	970	1,167	0,539	861	851	55310	706

Вместе с тем, согласно данным Г. С. Креймера, статический предел прочности твердых сплавов с увеличением содержания кобальта изменяется немонотонно, обнаруживая максимум при 37% Со, т. е. для рассматриваемых сплавов с увеличением содержания кобальта статическая прочность возрастает. Указанные факторы, в соответствии с уравнением [4], для определения критической энергии формообразования способствуют увеличению параметра удельной энергии изнашивания. Таким образом, для каждого конкретного обрабатываемого материала должно существовать определенное оптимальное количество Со в твердом сплаве, определяемое конкурирующими процессами, перечисленными выше.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Снижение интенсивности износа и повышение надежности инструмента в значительной мере определяется как исходными физико-механическими параметрами инструментального материала, так и возможностью их поддержания при высокой температуре достаточное время.

На основании экспериментального и теоретического изучения связи между пластической деформацией и разрушением в работе [5] высказана гипотеза, согласно которой всякому разрушению (в том числе и хрупкому), предшествует локализация пластической деформации, связанная с потерей устойчивости образца. По мнению ряда исследователей [1, 2, 5], определяющим итогом пластической деформации при износе режущего инструмента является зарождение микротрещин – очагов будущего разрушения. В дальнейшем в процессе резания под действием пластической деформации число этих трещин растет и они приводят к потере работоспособности инструмента.

Для исследования взаимосвязи износостойкости с условиями локализации и трещинообразования в опасном сечении режущего клина с учетом времени его работы были проведены исследования микротвердости тонких слоев инструмента у поверхности трения. Измерение микротвердости  $H_{\mu}$  проводили при достижении фаски износа  $h_3 = 0,1$  мм,  $h_3 = 0,2$  мм,  $h_3 = 0,3$  мм и т. д.

Стойкостные зависимости в данном исследовании устанавливали на основе построения кривых износа задней поверхности резцов  $h_3$  в функции длины резания  $l$ . На основании графиков  $h_3 = f(l)$  рассчитаны величины относительного поверхностного износа  $h_{опз} = \Delta h / \Delta l \times 10S$  (интенсивности износа резца), путь резания  $l$  до принятого критерия затупления, период  $T$  стойкости резца и построены их зависимости от скорости резания (рис. 4).

На основании полученных данных [4] можно сделать вывод о том, что при точении сплава 12Х18Н10Т резцом ВК8 наблюдаются два минимума интенсивности износа  $h_{опз}$ . Варьирование  $S$  и  $t$ , изменяя скорость резания, при которых наблюдаются эти минимумы, не меняет величины  $\theta_{01}$  и  $\theta_{02}$ , что полностью соответствует положению о постоянстве оптимальной температуре резания [2]. Первая оптимальная температура соответствует  $\theta_{01} = 700$  °С, вторая  $\theta_{02} = 970$  °С.

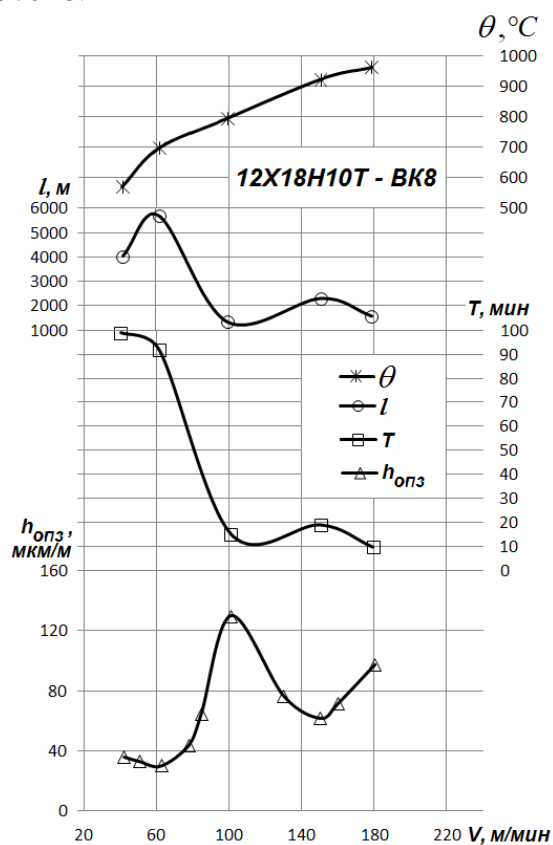
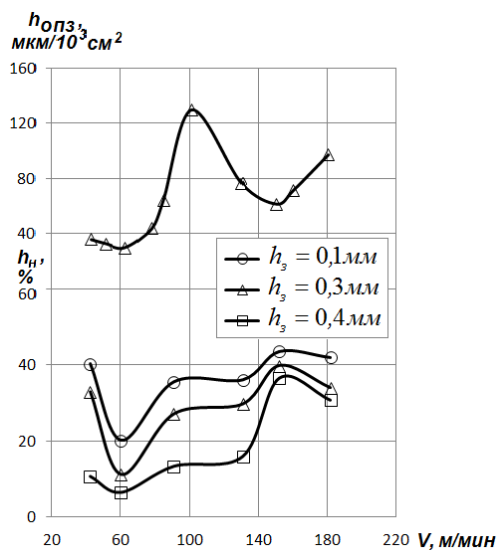


Рис. 4. Зависимости температуры резания  $\theta$ , пути резания  $l$  и периода стойкости  $T$  от скорости резания при точении стали 12Х18Н10Т резцом ВК8 ( $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)

По результатам стойкостных экспериментов для исследования процесса локализации пластической деформации режущего клина выбраны характерные скорости резания, включающие обе оптимальные скорости  $V_{O1} = 60$  м/мин и  $V_{O2} = 150$  м/мин, и по две скорости выше и ниже оптимальных скоростей  $V = 40, 90, 125, 180$  м/мин. Анализ результатов измерения микротвердости резца для данных скоростей показал, что для всех исследованных скоростей резания по мере затупления режущего инструмента микротвердость в опасном сечении снижается, причем расстояние от режущей кромки до точки минимума  $H_{\mu}$  в зоне приработочного и установившегося износа увеличивается. Это свидетельствует о том, что в зоне установившегося износа интенсивность ослабления поперечного сечения  $\beta$  при локализации пластической деформации за счет образования микротрещин на передней поверхности резца остается примерно постоянной: в выражении  $\beta = \frac{1}{F} \cdot \frac{dF_{тр}}{de}$

с ростом  $h_3$  увеличивается  $dF_{тр} / de$  (это регистрируется снижением  $H_{\mu}$ ) но одновременно растет и  $F$  за счет перемещения опасного сечения с пониженной микротвердостью в направлении от вершины резца вглубь режущего клина. При приближении износа к критическому значению минимум микротвердости начинает смещаться ближе к режущей кромке, что приводит к резкому увеличению  $\beta$  и, как следствие этого, к катастрофическому износу резца.



**Рис. 5.** Зависимость относительного снижения  $h_{н}$  и величины  $h_{опз}$  от скорости резания при различных фасках износа

Следует отметить, что относительное снижение микротвердости  $h_{н}$  в опасном сечении с увеличением ширины фаски износа  $h_3$  минимально при скоростях резания, обеспечивающих наименьшую интенсивность износа режущего инструмента (рис. 5).

### 3. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРИКОНТАКТНЫХ СЛОЕВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО И ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛОВ

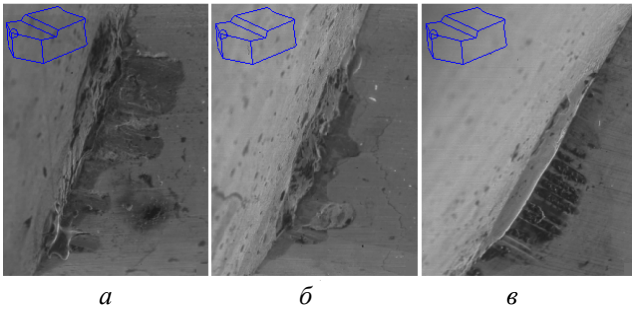
В процессе резания в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом контактные площадки на передней и задней поверхностях инструмента изнашиваются. Износ инструмента происходит при всех практически возможных условиях резания и физико-механических свойствах как инструментального так и обрабатываемого материалов. Несмотря на значительное число работ в этой области, установление механизма износа режущего инструмента остается актуальной задачей и требует новых исследований с применением более совершенных методов и аппаратуры.

Поскольку четкое обнаружение одного материала на поверхности другого возможно лишь при соотношении их средних атомных номеров примерно равным двум, были определены средние атомные номера инструментального ( $A_{ВК60М} = 66$ ) и обрабатываемого ( $A_{ХН73МБТЮ} = 28$ ) материалов. Подсчитав соотношение их атомных номеров  $K = 2,36$ , определили возможность визуального наблюдения характера контакта между ними. Это позволило при растровых сканированиях достоверно фиксировать присутствие обрабатываемого материала на поверхностях трения инструмента или обнаружить продукты износа на обработанных поверхностях детали.

Так как с увеличением атомного номера число поглощенных электронов уменьшается, то области исследуемой поверхности, содержащие частицы инструментального материала, будут выглядеть при изображении в поглощенных электронах в виде темных участков, а обрабатываемый материал – в виде светлого поля.

Результаты исследования поверхностей фасок износа (рис. 6) показывают, что различие во внешнем виде, характере течения металла на отдельных локальных участках площадок износа, наличие отдельных вырывов свидетельствует о различных по природе процессах, проте-

кающих в зоне контакта и обуславливающих механизм износа инструмента. Исследование микротвердости, структуры и химического состава площадок износа резца показали, что свойства материала поверхностного слоя резко отличаются от свойств сплава ВК6. Так, микротвердость колеблется в пределах 6000...20000 мПа, в то время как твердость исходного твердого сплава составляет 17000...20000 мПа.



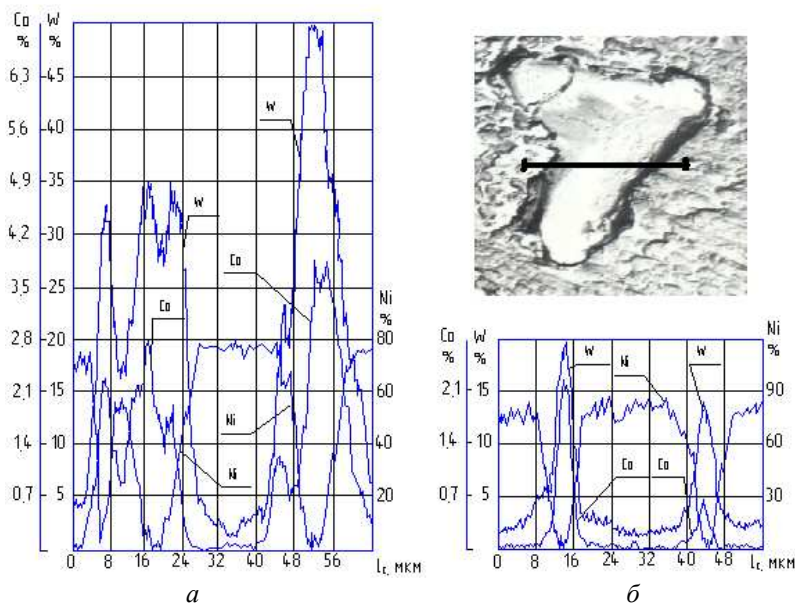
**Рис. 6.** Поверхность фаски износа твердосплавной пластины ВК6 после обработки жаропрочного сплава ХН73МБТЮ при скоростях резания: *a* – 30 м/мин ( $\times 35$ ), *б* – 40 м/мин ( $\times 43$ ), *в* – 70 м/мин ( $\times 43$ )

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что химический состав в отдельных зонах различен по содержанию W, Co и Ni, а иногда близок к содержанию этих элементов в сплаве ВК6. Поверхности трения, в зависимости от

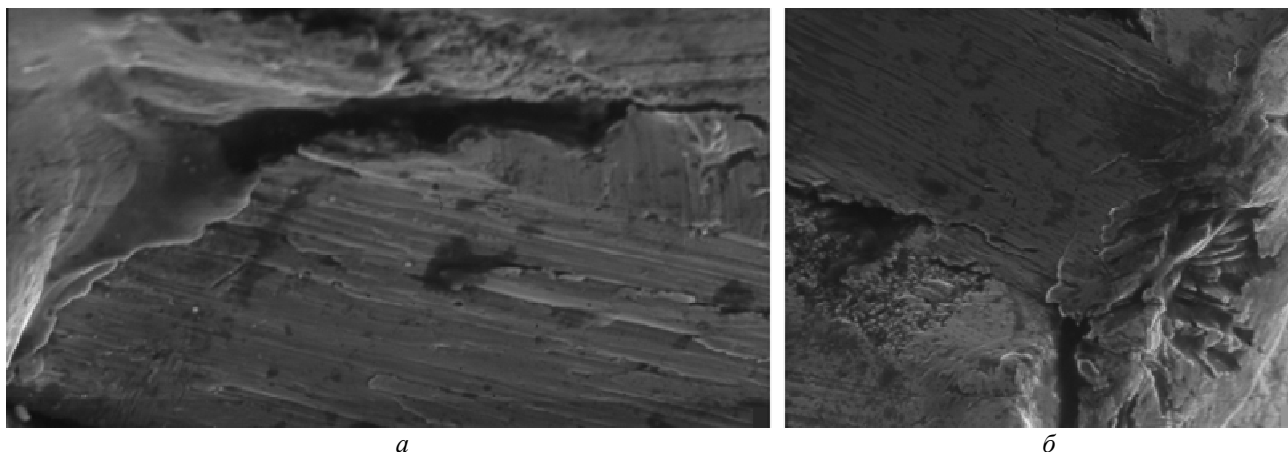
скорости резания и ширины фаски износа полностью или частично покрыты слоем обрабатываемого материала. На фаске износа после точения со скоростью  $V = 30$  м/мин не обнаружено выхода твердого сплава на поверхность трения, т. е. практически вся исследуемая поверхность фаски износа резца из твердого сплава ВК6 покрыта слоем обрабатываемого материала (рис. 7). Таким образом, при низкой скорости резания на задней поверхности инструмента имеет место пластический контакт по всей площадке износа.

При невысоких скоростях и температурах резания ( $V > V_0$ ) контактирование обрабатываемого и инструментального материалов имеет дискретный характер в виде наплывов из частиц обрабатываемого материала на поверхностях режущего инструмента, являются потенциальными очагами схватывания и отрыва за счет сил адгезии достаточно крупных частиц инструментального материала.

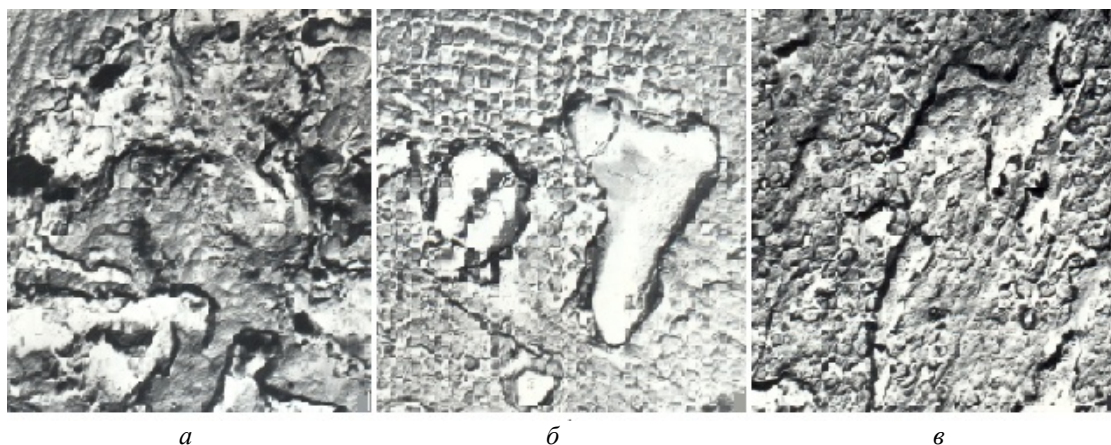
При  $V < V_0$  увеличивается толщина приконтактного слоя обрабатываемого материала с увеличением интенсивности протекания диффузионных процессов и образования трещин (рис. 8, *a*) вследствие циклического передеформирования этого слоя, что приводит к росту накопления энтропии в микрообъемах твердого сплава.



**Рис. 7.** Диаграмма распределения W, Co и Ni вдоль линии сканирования в районе выхода микрошлифа на фаску износа твердосплавной пластины ВК6 после обработки жаропрочного сплава ХН73МБТЮ при скорости резания: *a* – 20 м/мин; *б* – 40 м/мин



**Рис. 8.** Участок площадки износа инструмента после обработки жаропрочного сплава ХН73МБТЮ при скоростях резания: *а* – 40 м/мин ( $\times 800$ ), *б* – 30 м/мин ( $\times 340$ )



**Рис 9.** Влияние скорости резания на характер изменения микроструктуры сплава ХН73МБТЮ ( $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,5$  мм) по глубине поверхностного слоя  $\times 500$ : *а* – 30 м/мин; *б* – 40 м/мин; *в* – 50 м/мин

Первым условием, влияющим на термодинамическую устойчивость системы является эндотермичность структурно-фазовых превращений в тонких приконтактных слоях обрабатываемого материала, обуславливающая действие в этих слоях объемных источников теплопоглощения. В результате уменьшается накопление энтропии в изнашиваемом инструментальном материале и снижается интенсивность изнашивания. В этом случае структурно-фазовые превращения являются процессом устойчивой диссипативной структуры, обеспечивающей снижение производства избыточной энтропии в зоне контакта инструмента с деталью.

Возрастание плотности запасенной энергии в приповерхностных контактных слоях обрабатываемого материала до уровня, близкого к предельным значениям энергии плавления обрабатываемого материала и образование кважизжидкого слоя в контакте инструмента с дета-

люю показано в работе [1]. Ранее существование тонкого слоя твердого раствора на основе никелевого сплава и элементов химического состава твердого сплава (W, Ti, Co) покрывающего контактные поверхности режущего инструмента при обработке жаропрочных никелевых сплавов установлено в работе [2].

Микрорентгеноспектральным анализом обработанной поверхности детали при  $V = 30$  м/мин обнаружены зоны (рис. 9, *а*) с повышенным содержанием вольфрама, что указывает на факт механического внедрения продуктов износа в обработанную поверхность.

Размер зон с повышенным содержанием вольфрама колеблется от 2 до 9 мкм, в то время как размер зерен инструментального материала не превышает 1-3 мкм. Это свидетельствует об отрыве целых блоков инструментального материала с поверхности трения инструмента под действием сил адгезии. Следует, однако заме-

тять, что все микрократеры, возникающие на площадке износа инструмента вследствие локальных вырывов инструментального материала, в результате действия высоких контактных нагрузок и пластического течения полностью заполняются обрабатываемым материалом. В результате наблюдаемая под микроскопом поверхность трения имеет сравнительно ровную в направлении скорости резания поверхность.

С увеличением скорости резания интенсивность адгезионных явлений снижается (рис. 9, б, в), о чем свидетельствует факт уменьшения размера зон с повышенным содержанием вольфрама на участке сканирования обработанной поверхности. В то же время увеличение скорости, а, следовательно, и температуры резания, приводит к активизации диффузионных процессов.

### ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Установлено, что обрабатываемый материал в силу своих физико-механических свойств и химического состава определяет как уровень оптимальных режимов резания, так и форму и характер зависимости интенсивности износа инструмента от температуры резания.

2. Увеличение содержания кобальта в твердом сплаве способствует повышению уровня локальной интенсивности износа, отнесенной к единичному пятну контакта  $i_h$  вследствие развития микротрещин по кобальтовой прослойке и большего, в связи с этим, размера частицы износа.

3. Установлено, что оптимальной, с точки зрения износостойкости инструмента, скорости (температуре) резания соответствует наименьшее разупрочнение рабочей части инструмента по критериям относительного снижения его микротвердости и интенсивности ослабления опасного сечения режущего клина в зоне локализации пластической деформации.

4. Установлено, что с увеличением скорости (температуры) резания выше оптимальной изменяется структурно-фазовый состав приконтактных слоев инструментального и обрабатываемого материалов; дискретный характер контактирования инструментального и обрабатываемого материалов становится непрерывным вследствие снижения упругих и прочностных характеристик обрабатываемого материала, что

приводит к снижению усталостной контактной прочности инструментального материала, в результате чего происходит увеличение размеров единичной частицы износа и интенсивности изнашивания инструмента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лоладзе Т. Н.** Основы создания эффективных инструментальных материалов для обработки жаропрочных сплавов и специальных сталей: конспект лекций. Тбилиси: Грузинск. политехн. ин-т, 1976. 44 с.
2. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
3. **Постнов В. В., Шолом В. Ю., Шустер Л. Ш.** Методы и результаты оценки контактного взаимодействия применительно к процессам металлообработки. М.: Машиностроение, 2004. 103 с.
4. **Хадиуллин С. Х., Постнов В. В.** Термодинамический критерий оценки режущей способности инструментальных материалов // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9. № 6(24). С. 162–169.
5. Методы повышения работоспособности режущего инструмента при нестационарном резании / [и др.] // Вестник РГАТА. 2007. № 1(11). С. 318–321.

### ОБ АВТОРАХ

**Постнов Владимир Валентинович**, зав. каф. мехатронных станочн. систем. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1972). Д-р техн. наук по технологии и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. физ. оптимизации нестационарных процессов резания жаропрочн. сталей и сплавов.

**Хадиуллин Салават Хакимович**, ст. преп. той же каф. Дипл. инженер по мехатронике (УГАТУ, 2005), Канд. техн. наук по технологии и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (РГАТА, 2011). Иссл. в обл. физ.-мех. свойств и механики контактных процессов материалов.

**Малахов Евгений Николаевич**, асп. той же каф. Дипл. инженер по мехатронике (УГАТУ, 2009). Готовит диссертацию в области диссипации энергетических потоков при лезвийной обработке.

**Старовойтов Семен Владимирович**, студент спец. «Мехатроника». Иссл. в обл. динамики формирования адгезионной связи инструмента и заготовки.